

# СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ

**НАУЧНО-  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ**

МИНИСТЕРСТВО  
РЕГИОНАЛЬНОГО  
РАЗВИТИЯ  
РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

ОАО  
«НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

**5**  
**2014**



# СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1 января 1959 г.  
Выходит один раз в два месяца

Учредитель: ОАО «НИЦ «Строительство»

МОСКВА. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко

5<sup>(256)</sup>  
2014

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор  
**ВЕДЯКОВ И.И.** проф., д.т.н.

**АББАСОВ П.А.**

чл.корр. РААСН, проф., д.т.н.

**АЙЗЕНБЕРГ Я.М.** проф., д.т.н.

**АНДРЕЕВ В.И.**

чл.корр. РААСН, проф., д.т.н.

**БОНДАРЕНКО В.М.**

акад. РААСН, проф., д.т.н.

**ВАРДАНЯН Г.С.** проф., д.т.н.

**ГОРОДЕЦКИЙ А.С.**

акад. РААСН, проф., д.т.н.

**ЕГОРЬЧЕВ О.О.** проф., д.т.н.

**ЕРЕМЕЕВ П.Г.** проф., д.т.н.

**ИГНАТЬЕВ В.А.** проф., д.т.н.

**ИЛЬЧИЧЕВ В.А.** акад. РААСН,

проф., д.т.н.

**КАРПЕНКО Н.И.**

акад. РААСН, проф., д.т.н.

**КОЛЧУНОВ В.И.**

акад. РААСН, проф., д.т.н.

**КОСИЦЫН С.Б.** проф., д.т.н.

**КУРБАЦКИЙ Е.Н.** проф., д.т.н.

**ЛЯХОВИЧ Л.С.**

акад. РААСН, проф., д.т.н.

**МОНДРУС В.Л.** проф., д.т.н.

**НАЗАРОВ Ю.П.** д.т.н.

**НЕМЧИНОВ Ю.И.** проф., д.т.н.

**ОБОЗОВ В.И.** проф., д.т.н.

**ОДЕССКИЙ П.Д.** проф., д.т.н.

**ПЯТИКРЕСТОВСКИЙ К.П.**

(отв. секретарь) д.т.н., с.н.с

**РАЙЗЕР В.Д.** проф., д.т.н.

**РАСТОРГУЕВ Б.С.** проф., д.т.н.

**ТРАВУШ В.И.** акад. РААСН, проф., д.т.н.

**ФЕДОРОВ В.С.** акад. РААСН, проф., д.т.н.

**ХАЧИЯН Э.Е.** проф., д.т.н.

**ЧИРКОВ В.П.** проф., д.т.н.

**ШАПОШНИКОВ Н.Н.**

чл.корр. РААСН, проф., д.т.н.

Редактор выпуска *Пятикостровский К.П.*

Корректор *Козлова М.В.*

Компьютерная верстка *Севастьянова М.Г.*

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ №ФС77-19167 от 27 декабря 2004 г.

### Адрес редакции:

109428, Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, стр. 1

Тел.: 8-499-170-10-81; 8-499-174-79-93

E-mail: [stroydex@list.ru](mailto:stroydex@list.ru), [stroydexrs@gmail.com](mailto:stroydexrs@gmail.com)

[www.stroy-mex.narod.ru](http://www.stroy-mex.narod.ru)

[http://elibrary.ru/TITLE\\_ABOUT.ASP?ID=26727](http://elibrary.ru/TITLE_ABOUT.ASP?ID=26727)

Подписано в печать 12.09.2014. Формат 70×108 1/16

Бумага офсетная. Офсетная печать. Тираж 500 экз.

Заказ №

Отпечатано в

ООО «Первая оперативная типография»

115114, Москва, 2-й Кожевнический пер., д. 12

### Перепечатка материалов журнала

«Строительная механика и расчет сооружений»

допускается только с письменного разрешения редакции.

При цитировании ссылка обязательна.

*Представленные заказчиками готовые формы рекламных материалов не подвергаются редакторской правке и печатаются в оригинале.*

И.С. ГОРНОСТАЕВ<sup>1</sup>, инж., Н.В. КЛЮЕВА<sup>1</sup>, д-р техн. наук,  
Вл.И. КОЛЧУНОВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф., И.А. ЯКОВЕНКО<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет, г. Курск

<sup>2</sup> Национальный авиационный университет, г. Киев

## ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С НАКЛОННЫМИ ТРЕЩИНАМИ

*Построена расчетная модель деформативности железобетонных составных конструкций на участках с наклонными трещинами, опирающаяся на пятиблочную расчетную схему, включающую наклонные трещины различных типов и расчетную схему в виде единичной полоски. Разработана расчетная методика для определения деформативности железобетонных составных конструкций на участках с наклонными трещинами при учете условных сосредоточенных сдвигов в швах и в швах-трещинах, несовместности деформаций бетона и арматуры и эффекта нарушения сплошности бетона.*

**Ключевые слова:** железобетонные составные конструкции, деформативность, наклонные трещины, нарушение сплошности, расчетная схема, условные сосредоточенные сдвиги, швы.

Анализ результатов проведенных исследований, а также практика проектирования и опыт применения железобетонных составных конструкций говорят о том, что часто имеют место случаи, когда класс бетона, размеры сечений и площадь растянутой арматуры по деформативности (жесткости), больше, чем это требуется по прочности.

Анализ сопротивления железобетонных составных конструкций показывает, что при наличии наклонных трещин здесь происходит резкое изменение конструктивных характеристик и свойств материалов.

Отсюда следует, что проведение экспериментально-теоретических исследований по разработке практического способа расчета деформативности железобетонных составных конструкций на участках с наклонными трещинами с учетом наличия этих трещин и эффекта нарушения сплошности железобетона является весьма актуальной задачей. Решение этой задачи может рассматриваться как заметное достижение в развитии методов расчета железобетонных составных конструкций.

Теоретические и экспериментальные исследования составных железобетонных конструкций в своем подавляющем большинстве базируются на предпосылке об абсолютно жестком шве сопряжения между элементами [1, 2 и др.], что, как правило, приводит к заметному расхождению результатов расчета и эксперимента.

Усиливаемые железобетонные конструкции, которые также моделируются в виде составного железобетонного стержня, в последние годы становятся одними из важнейших в области железобетона [1–4].

В работе В.М. Бондаренко, В.И. Колчунова [5] обращено внимание на весьма существенные эффекты напряженно-деформированного состояния, происходящие в железобетоне в результате нарушения его сплошности, которые объясняют физический смысл многих явлений, замеченных в опыте.

В развитие этих исследований и на основании углубленного исследования природы и характера трещинообразования предложена расчетная модель, позволяющая описывать наклонные трещины, начинающиеся с растянутой зоны и развивающиеся к источнику нагружения трещины первого типа, а также наклонные трещины, образующиеся в окрестности нейтральной оси, и развивающихся как в сторону сжатой, так и растянутой зон (трещины второго и третьего типа).

Для предельных состояний 2-ой группы усилие в сжатом бетоне  $N_{b,1}$  определяется по известной составляющей поперечной силы  $Q_{b,1}$ , отыскиваемой из условия равновесия с использованием механической модели сжатой зоны над наклонной трещиной в окрестности сечения I–I (рис. 1). При этом «нагельные» усилия в продольной и поперечной арматуре определяются на основании расчетной модели второго уровня, предложенных в работе [5].

Необходимым элементом также является выбор места проведения второго поперечного сечения, используемого в расчетной модели и определяемого тем, что концы веера наклонных трещин могут проникать в зону местных напряжений на различную глубину. Такое сечение можно расположить на расстоянии равном  $0,5h_0$  от сечения I–I, т. е. в зоне, где местные напряжения еще не имеют разрывов. Это позволяет для определения нормальных ( $\sigma_{b,4}$ ) и касательных ( $\tau_{b,4}$ ) напряжений в сжатой зоне арки использовать следующие отношения:

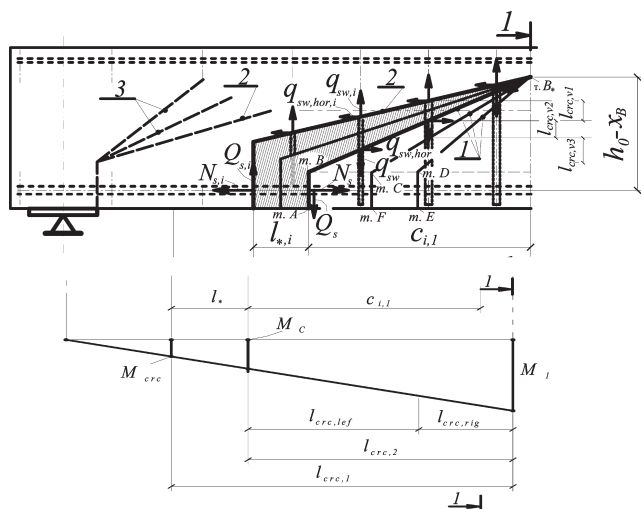


Рис. 1. Расчетная схема для определения расстояний между трещинами и усилий в продольной и поперечной арматуре в смежных трещинах

$$K_1 = \frac{M_{изг,II} + M_{loc,II}}{M_{изг,I} + M_{loc,I}} \quad (1); \quad K_2 = \frac{Q_{изг,II} + Q_{loc,II}}{Q_{изг,I} + Q_{loc,I}} \quad (2)$$

Здесь  $M_{изг,II}$ ,  $M_{loc,II}$ ,  $Q_{изг,II}$ ,  $Q_{loc,II}$ ,  $M_{изг,I}$ ,  $M_{loc,I}$ ,  $Q_{изг,I}$ ,  $Q_{loc,I}$  — стержневые и местные изгибающие моменты и поперечные силы (определяемые по предложениям С.П. Тимошенко) в первом и втором сечении, соответственно.

Тогда, зная  $\sigma_{b,I}$  и  $\tau_{b,I}$  в первом сечении, можно перейти к напряжениям  $\sigma_{b,II}$  и  $\tau_{b,II}$  во втором сечении:

$$\sigma_{b,II} = \sigma_{b,I} K_1, \quad (3); \quad \tau_{b,II} = \tau_{b,I} K_2. \quad (4)$$

Определение координат точек приопорной арки, используемой в расчетной модели, не вызывает затруднений, так как известно уравнение параболы (моделирующей профиль трещины), расстояние между обозначенными сечениями и высота бетона от нижней грани до начала трещины.

Последовательно перемещаясь от одной трещины к другой (см. рис. 1), используемая расчетная схема позволяет определить на основании условий равновесия усилия в продольной и поперечной арматуре в любой трещине.

Образование последующего уровня наклонных трещин происходит после достижения главными деформациями удлинения бетона, в точках, расположенных вдоль оси поперечной арматуры своих предельных значений  $\epsilon_{bt,ul}$  (в процессе нагружения имеет место несколько уровней трещинообразования).

Расстояния между трещинами второго уровня вдоль оси продольной арматуры (см. рис. 1) отыскивается из соотношения между изгибающим моментом в сечении I—I и в сечении с опасной наклонной трещиной (по критерию максимальной ширины ее раскрытия):

$$l_{crc,2} = \frac{a \cdot (M_I - M_C)}{M_I}. \quad (5)$$

Появление последующего уровня трещинообразования соответствует нагрузке, при которой соблюдается из неравенства

$$l_{crc,i} \leq \eta \cdot l_{crc,i-1}. \quad (6)$$

Расстояние между трещинами последующего уровня вдоль осей поперечной арматуры определяется с использованием расчетных схем второго уровня, которые вырезают фрагмент бетона между хомутами, от опасной косоугольной трещины до сечения, где главные деформации удлинения бетона достигают своих предельных значений:

$$l_{crc} = \frac{2(\ln B_4 - Bt_*)}{-B}, \quad (7)$$

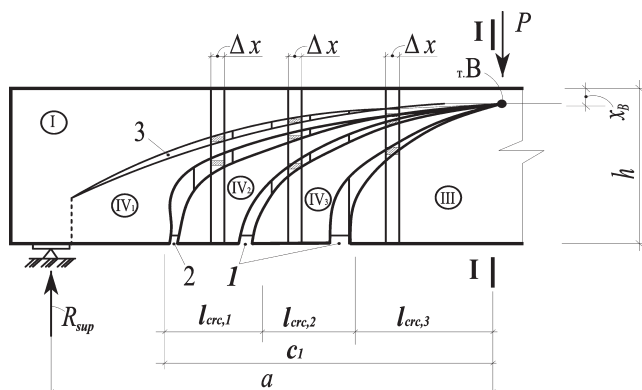


Рис. 2. Расчетная схема единичных полосок железобетонного составного стержня на участках с наклонными трещинами

где параметры  $B, B_2, B_3, B_4, l_*$  выражены в виде функций от предельных деформаций удлинения бетона, параметров, учитывающих эффект нарушения сплошности, геометрических параметров, параметров сцепления, арматуры, бетона определяемые в соответствии с работой [5].

Располагая уровнями трещинообразования вдоль продольной и поперечной арматуры в пролете «среза», строится веер трещин (в виде ломаных линий) первого, второго и третьего типов, прилегающий к сосредоточенной силе и к опоре (см. рис. 2). Степень развития наклонных трещин (пересекут ли эти трещины поперечную арматуру) определяются из рассмотрения напряженно-деформированного состояния бетона вдоль хомутов. При этом деформации бетона вдоль оси хомутов определяются по формуле:

$$\begin{aligned} \varepsilon_M(y) &= \sigma_{sw} A_{sw} \cdot \frac{1}{D_3} - \sigma_{sw}(y) A_{sw} \cdot \frac{1}{D_3} + \frac{D_4}{D_3} \cdot y + \frac{D_5}{D_3} = \\ &= \varepsilon_{sw} \cdot E_{sw} \cdot A_{sw} \cdot \frac{1}{D_3} - \varepsilon_{sw}(y) \cdot E_{sw} \cdot A_{sw} \cdot \frac{1}{D_3} + \frac{D_4}{D_3} \cdot y + \frac{D_5}{D_3}, \end{aligned} \quad (8)$$

где параметры  $D_1 \dots D_{12}$  выражены в виде функций от усилий в арках, образованных наклонными трещинами (см. рис. 2), параметров бетона, армирования и сцепления.

Здесь под раскрытием трещин здесь понимается накопление относительных условных сосредоточенных взаимных смещений арматуры и бетона на участках, расположенных по обе стороны от трещины. Учитывается также дополнительное деформационное воздействие в трещине, связанное с нарушением сплошности материала. Из физических соображений в формуле для определения ширины раскрытия трещин наиболее логично использовать уровневое (дискретное) значение  $l_{crc}$  (в соответствии с неравенством (6)). В итоге ширина раскрытия наклонных трещин определяется по формуле:

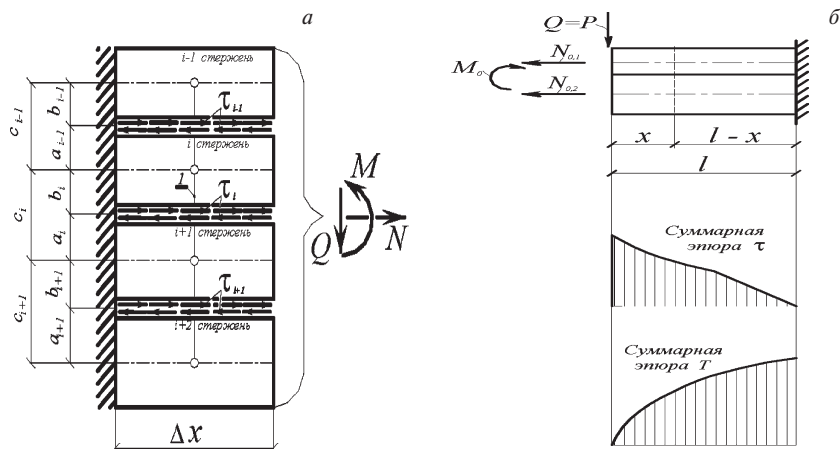
$$a_{crc} = -\frac{2\Delta T}{G} - \frac{2B_{a,2}}{B} - \frac{2B_2}{B} \ln \left\{ 1 + \frac{B_{a,2} \cdot A_{sw} E_{sw}}{q_{sw} S + B_{a,1} A_{sw} E_{sw}} \right\} \quad (9)$$

Проекции наклонных трещин первого, второго (начинающихся на нейтральной оси и выходящих под силу или опору) и (выходящих в любую точку верхней грани) третьего типов, с максимальной шириной раскрытия, определяются из условия экстремума функций многих переменных  $F_{1,2} = f(q_{sw}, x_{B,2}, \sigma_s, x, \sigma_{s,1}, \sigma_{s,2}, \sigma_{s,3}, \sigma_{s,4}, \sigma_{s,5}, \sigma_{s,6}, \sigma_{s,7}, C_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7)$  и  $F_3 = f(q_{sw}, x_{B,2}, \sigma_{s,3}, c_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ , соответственно, и вытекающих из условия равенств нулю частных производных. После преобразований, для трещин первого, второго и третьего типов, будем иметь, соответственно:

$$H_1 c_2^2 + H_2 c_2 + H_3 = 0 \quad (10)$$

$$\text{и } (k_1 k_2 k_{21} + k_1 k_{21} + k_1 k_{23}) C_2^2 + C_2 + k_1 k_{22} - k_1 k_2 k_{21} = 0, \quad (11)$$

где  $H_1, H_2, H_3; k_1, k_2 \dots k_{23}$  — функции от обобщенной нагрузки  $R_{sup}$ , геометрических характери-



**Рис. 3.** Сведение задачи о расчете консольного составного стержня из многих брусьев (а), к задаче о расчете консольного составного стержня из двух брусьев с помощью переменных  $T_k$  и  $R_k$  путем разложения внешней нагрузки  $M, N, Q$  по собственным функциям основной системы уравнений консольного составного стержня (б)

стик сечений ( $b, h, h_0$ ), характеристик бетона и арматуры ( $A_s, A_{s,1}, A_{sw}, A_{s,3}, E_{sw}, S$ ), параметра работы растянутого бетона ( $\psi_s$ ) в сечении 1–1, напряжений и усилий в бетоне и арматуре в расчетных сечениях, параметров сцепления в зоне анкеровки.

Физическая интерпретация полученного решения заключается в том, что они позволяют отыскивать проекции наклонных трещин первого, второго и третьего типов с максимальной шириной раскрытия.

После отыскания наиболее опасных наклонных трещин с помощью зависимости (5)–(8) проверяется наличие смежных трещин и трещин последующих уровней. Далее можно переходить к оценке деформативности железобетонных составных конструкций на участках с наклонными трещинами. Для этого вырезаются вертикальные единичные полоски (см. рис. 2), которая рассчитывается по схеме составного стержня с податливыми швами между разными бетонами и податливыми швами – трещинами. В местах пересечения полоски наклонная трещина принимается горизонтальной.

Выделенная двумя поперечными сечениями вертикальная полоска длиной  $\Delta x$ , может быть рассмотрена в виде консольного составного стержня (рис. 3).

Применительно к такой расчетной схеме система дифференциальных уравнений теории составных стержней может быть записана в виде [6]:

$$\lambda_k^2 \bar{T}_k + R_k - \bar{T}_k = 0, (k = 1, 2, \dots, n). \quad (13)$$

Значения  $\bar{T}_k$  и  $R_k$  представляющие собой линейные комбинации усилий и обобщенные нагрузки, можно рассматривать как обобщенные внутренние силы. Уравнения (13), имеют общие интегралы:

$$\bar{T}_k = A_k sh\lambda_k x + B_k ch\lambda_k x + \frac{1}{\lambda_k} \int_0^x R_k(t) sh\lambda_k(x-t) dt \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (14)$$

где  $A_k$  и  $B_k$  – произвольные постоянные.

При использовании условий нормированности и свойств ортогональности собственных векторов  $u_{i,k}$  матрицы система (13) распадается на  $n$  независимых дифференциальных уравнений второго порядка, и расчет сложного составного стержня из  $(n+1)$ -го бруса сводится к расчету  $n$  условных простых составных стержней из двух брусьев (рис. 3, б).

При внецентренном сжатии задачу будем рассматривать без учета дополнительных моментов, возникающих в результате прогиба стержня. Решение уравнения (14) применительно к рассматриваемой консольной расчетной схеме при воздействии  $M, N, Q$  (рис. 4, б) имеет вид:

$$T = \frac{\Delta}{\gamma} \left( \frac{ch\lambda(l-x)}{ch\lambda l} - 1 \right) + \frac{P \cdot c}{\lambda \gamma \sum EI} \left( \frac{sh\lambda x}{ch\lambda l} - \lambda x \right), \quad (15)$$

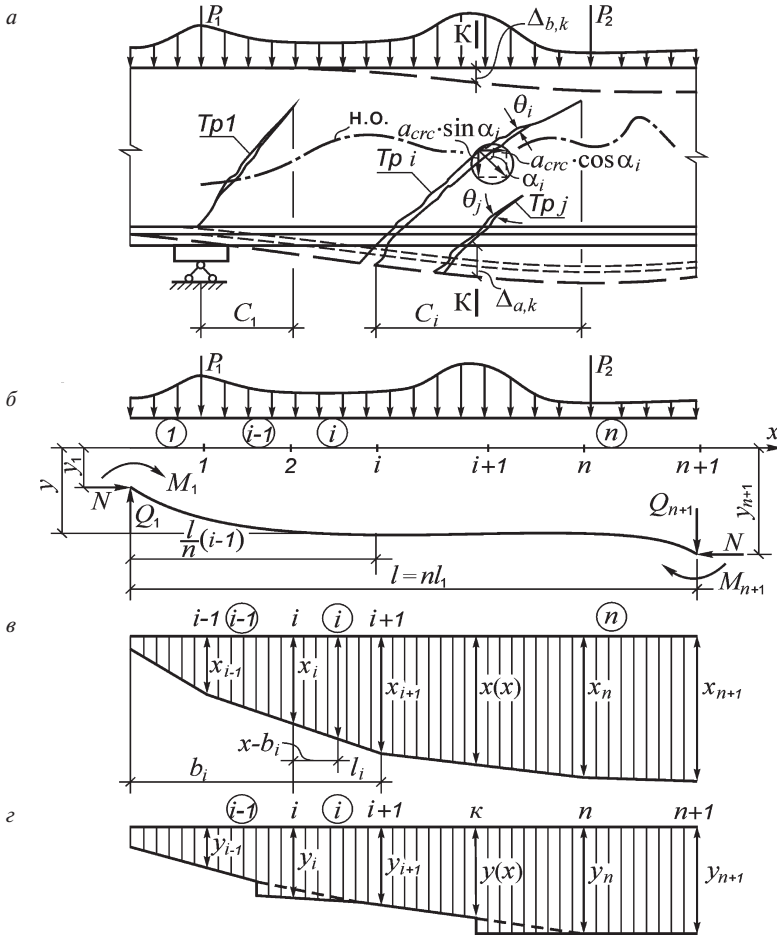


Рис. 4. К расчету железобетонного элемента по деформациям на участках с наклонными трещинами: а – схема трещин и перемещения в сечении  $k$ ; б – расчетная схема стержня; в – эпюра кривизны; з – эпюра прогибов

$$\tau = \frac{\xi \Delta s h \lambda (l-x)}{\lambda c h \lambda l} + \frac{P \cdot c}{\gamma \sum EI} \left( \frac{c h \lambda x}{c h \lambda l} - 1 \right), \quad (16)$$

где  $\lambda = \sqrt{\xi \cdot \gamma}$ ,  $\gamma$ ,  $\Delta$  определяются до образования трещин по формулам теории составных стержней, а при наличии трещин в растянутой зоне железобетонной конструкции, по формулам:

$$\Delta = -\frac{N_{0,1}}{(E_{b,1} A_{b,1})_{ekv}} + \frac{N_{0,2}}{(E_{b,2} A_{b,2})_{ekv}} - \frac{f(x_{crc})}{\rho}, \quad (17)$$

$$\lambda = \sqrt{\xi \gamma} = \sqrt{\xi \left[ \frac{1}{(E_{b,1} A_{b,1})_{ekv}} + \frac{1}{(E_{b,2} A_{b,2})_{ekv}} + \frac{f^2(x_{crc})}{M \cdot \rho} \right]}. \quad (18)$$

Здесь  $N_{0,1}$ ,  $N_{0,2}$  – продольные силы от внешней нагрузки в 1-ом и 2-ом железобетонном стержне соответственно;  $(E_{b,1} A_{b,1})_{ekv}$ ,  $(E_{b,2} A_{b,2})_{ekv}$  – эквивалентные жесткости поперечных сечений отдельных железобетонных стержней;  $\rho$  – радиус кривизны железобетонного составного стержня. До образования трещин в составном стержне в формулах (15), (16)  $\sum EI = M \cdot \rho$ ;  $M$  – полный момент в составном стержне;  $\xi$  – жесткость шва, определяется на основании экспериментальных исследований составных призм, в том числе армированных;  $(E_{b,i} A_{b,i})_{ekv} = \frac{N_i}{\epsilon_0}$ ;

$\epsilon_0 = B_{12} M_i + B_{22} N_i$ ,  $B_{12}$  и  $B_{22}$  — определяются в соответствии с предложениями Н. И. Карпенко включенными в нормативные документы [7].

Расчет по деформациям железобетонных составных конструкций на участках с наклонными трещинами осуществляется с использованием кривизны в  $n$  выбранных сечениях, определяемой следующим образом.

В окрестностях сделанных сечений выделяются единичные полоски (см. рис. 2). Перемещения от раскрытия трещин в пределах такой полоски разлагаются на горизонтальные и вертикальные составляющие. Для выделенных единичных полосок составного стержня определяется работа внутренних сил, включая работу внутренних усилий в составляющих стержнях, работу податливых поперечных связей и связей сдвига.

Учитывая внутренние усилия  $M$  и  $N$  в составляющих стержнях в виде внецентренного сжатия (растяжения), можно записать приходящуюся на единицу длины работу внутренних усилий в  $i$ -ом стержне в виде:

$$A_i = \frac{2M_i^2}{3E_i I_i}. \quad (19)$$

Здесь

$$M_i = M_{0i} + N_{0i} \cdot e_i - T_{i-1} \cdot a_{i-1} - T_i \cdot b_i + S_{i-1} \cdot 0,5 \cdot c - S_i \cdot 0,5 \cdot c, \quad (20)$$

где  $M_{0i}$  и  $N_{0i}$  — изгибающий момент и продольная сила в  $i$ -м стержне от действия нагрузки без учета усилий в связях;  $e_i$  — эксцентриситет силы  $N_{0i}$  относительно изогнутой оси  $i$ -го стержня;  $T_{i-1}$ ,  $S_{i-1}$ ,  $T_i$ ,  $S_i$  — погонные сдвигающие и поперечные усилия в  $i-1$ -м и  $i$ -м швах соответственно;  $a_{i-1}$ ,  $b_i$  — расстояние от  $(i-1)$ -го и  $i$ -го шва до нейтральной оси  $i$ -го стержня;  $c$  — единичная длина выделенной полоски.

Здесь в целях упрощения вычислений и единства методологического подхода, используемого в дальнейшем для расчета систем железобетонных элементов, под жесткостью стержневого железобетонного элемента с трещинами  $B_i$  будем понимать коэффициент пропорциональности между полным изгибающим моментом и кривизной, т.е.  $B_i = M_i / \chi_i$ . Тогда выразив в формуле (19) жесткость  $E_i I_i$  через кривизну  $\chi_i$  и просуммировав работу внутренних усилий по всем составляющим стержням в единичной полоске, прилегающей к сечению  $k$ , (рис. 4, а) получим:

$$A_k = \frac{2}{3} \sum_{i=1}^{n+1} M_i \chi_i. \quad (21)$$

Работа податливых поперечных связей и связей сдвига единичной полоски, прилегающей к сечению  $k$ , для рассматриваемой задачи может быть записана в виде:

$$A_{k,w} = \frac{2}{3} \sum_{i=1}^n q_{1sw,i} a_{cre,i} \sin \alpha_i + \frac{2}{3} \sum_{i=1}^n q_{2sw,i} a_{cre,i} \cos \alpha_i, \quad (22)$$

где  $q_{1sw,i}$  и  $q_{2sw,i}$  — соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие погонного усилия в  $i$ -м шве в сечении  $k$ ;  $a_{cre,i}$  — ширина раскрытия  $i$ -й трещины в сечении  $k$ ;  $\alpha_i$  — угол наклона  $i$ -й трещины в сечении  $k$ .

В итоге суммарная работа внутренних сил для единичной полоски, прилегающей к сечению  $k$ , равна

$$A_{k,\Sigma} = A_k + A_{k,w}. \quad (23)$$

Располагая величиной  $A_{k,\Sigma}$ , можно заменить единичную полоску составного стержня с трещинами на эквивалентную единичную полоску квазисплошного железобетонного стержня, внутренняя работа которой равна  $A_{k,\Sigma}$ . При этом для  $k$ -го сечения значение кривизны может быть определено из выражения:

$$\chi_k = \frac{3A_{k,\Sigma}}{2(M_{0,k} + N_{0,k} y_k)}, \quad (24)$$

где  $M_{0,k}$  — суммарный момент в сечении  $k$ , приведенный к внешнему;  $y_k$  — расстояние от точки приложения равнодействующей силы  $N_{0,k}$  до изогнутой оси стержня на участке с наклонными трещинами ( $M_{0,k}$  и  $N_{0,k}$  уточняются в процессе итераций как внешние воздействия).

После нарушения сплошности железобетонного элемента ширина раскрытия трещин учитывается в формулах перемещений как сосредоточенная деформация сдвига. Эти деформации, а также сосредоточенные угловые деформации непосредственно включаются в уравнения прогибов и углов поворота.



Достаточно строгое решение для определения деформаций составной конструкции можно получить, если принять кусочно-линейную интерполяцию кривизны между выбранными сечениями, что равносильно аппроксимации изогнутой оси железобетонного стержня кубическим сплайном.

Рассмотрим произвольно нагруженный железобетонный стержень (рис. 4, б). Разобьем его на  $n$  участков. Тогда для  $i$ -го участка с абсциссами граничных точек  $b_i$  и  $b_i+l_i$  можно записать:

$$\chi(z) = \chi_i + \frac{\chi_{i+1} - \chi_i}{l_i} (z - b_i). \quad (25)$$

Подставим это выражение в дифференциальное уравнение сжато-изогнутого стержня ( $y_i'' = \chi$ ) и решим его относительно  $y$ . Затем, используя рекуррентные зависимости в форме метода начальных параметров, выразим постоянные интегрирования для  $i$ -го участка через постоянные интегрирования первого участка. В результате уравнение изогнутой оси стержня принимает вид:

$$y_i = y_1 + \varphi_1 l \frac{i-1}{n} + \frac{l^2}{n^2} \left[ \frac{-(3i-4)(M_1/B_1) - (M_i/B_i)}{6} - \sum_{j=2}^{i-1} (M_j/B_j)(i-j) \right] + \delta_i, \quad (26)$$

а уравнение углов поворота –

$$\varphi_i = \varphi_1 + \frac{l}{n} \left[ \frac{-(M_1/B_1) - (M_i/B_i)}{2} - \sum_{j=2}^{i-1} (M_j/B_j) \right] + \theta_i. \quad (27)$$

Здесь с помощью параметров  $\delta_i$  и  $\theta_i$  соответственно учитываются сосредоточенные деформации сдвига и сосредоточенные угловые деформации в  $i$ -м сечении на уровне нейтральной оси (см. рис. 4, а):

$$\delta_i = \sum_{i=1}^{n-m} a_{crc,S,i} \sin \alpha_i \quad (28); \quad \theta_i = \sum_{i=1}^{n-m} \frac{a_{crc,S,i} \sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_i}{C_i}. \quad (29)$$

где  $a_{crc,i}$  и  $a_{crc,S,i}$  — ширина раскрытия трещины перпендикулярное берегам и вдоль оси продольной арматуры, соответственно.

Таким образом, получены аналитические выражения для оценки перемещений железобетонных составных конструкций с учетом наклонных трещин в их приопорных зонах. При этом уместно заметить, что уравнения деформации (26), (27) могут быть использованы и для участков железобетонной конструкции с нормальными трещинами при  $\delta_i$  и  $\theta_i$  равными нулю и значениях жесткости определяемых по известным формулам теории железобетона.

\*\*\*

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента РФ для молодых ученых МД-6533.2013.8.*

### Литература

1. *Баширов Х. З.* Прочность железобетонных конструкций по наклонным трещинам третьего типа / Х.З. Баширов, В.С. Федоров, Вл.И. Колчунов, К.М. Чернов // Вестник гражданских инженеров, 2012. №5(34). С. 50–54.
2. *Верхожский Ю.В., Голышев А.Б., Колчунов Вл.И., Клоева Н.В., Лисицын Б.М., Мышков И.Л., Яковенко И.А.* Справочное пособие по строительной механике. В 2-х томах. Т. 1: Учеб. пособ. — М.: Изд-во АСВ, 2014. — 640 с. Т. 2: Учеб. пособ. — М.: Изд-во АСВ, 2014. — 432 с.
3. Жилые и общественные здания : краткий справочник инженера-конструктора. Под. ред. Ю. А. Дыховичного и В. И. Колчунова / Вл. И. Колчунов, И. А. Яковенко / Раздел 14. Общие указания по проектированию усиления железобетонных конструкций. — М.: Изд-во АСВ, 2011. Т. III. С. 311–428.
4. *Бондаренко В. М.* Расчетные модели силового сопротивления железобетона. Монография / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. — М.: АСВ, 2004. — 472 с.
5. *Колчунов Вл. И.* Расчетная модель «нагельного эффекта» в железобетонном элементе / Вл. И. Колчунов, Э. И. Задрванных // Изв. Вузов. Строительство, 1996. №10. С. 18–25.
6. *Ржаницын А.Р.* Составные стержни и пластинки // А.Р. Ржаницын. — М.: Стройиздат, 1986. — 316 с.
7. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.

## ABSTRACTS

UDC. 624.04: 539.3. Travush V.I. **History and main results of the fifth international symposium «Actual problems of computer simulation of structures and facilities»**

**Key words:** international symposium, computer simulation, structures.

UDC 624.04; 539.3; 539.4. Bialystok A.M., Akimov P.A., Pavlov A.S., Kaitoukov T.B., Afanasieva I.N. **About development, research and verification of correct numerical methods for solving of nonlinear problems of constructively deformation, stability and supercritical behavior of thin-walled shell-beam structures**

The distinctive paper is devoted to development, research and verification of correct numerical methods for solving of geometrically and physically nonlinear problems of constructively deformation, stability and supercritical behavior of thin-walled shell-beam structures. Conventional and contemporary theories and criteria of plasticity, numerical models of dynamic deformation of materials, numerical models of dynamic fracture, algorithms for the numerical solution of contact problems and methods of solving of problems with the geometric nonlinearity are under consideration.

**Key words:** finite element method, numerical methods, nonlinear problems, deformation, thin-walled shell-beam structures.

UDC 624.04; 539.3. Akimov P.A., Mozgaleva M.L., Kaitoukov T.B., Negrozov O.A., Mojtaba Aslam. **About verification of wavelet-based multilevel discrete and discrete-continual methods of local structural analysis**

The distinctive paper is devoted to verification of wavelet-based multilevel discrete and discrete-continual methods of local structural analysis, proposed by prof. A.B. Zolotov and prof. P.A. Akimov. ANSYS Mechanical simulation software has been used for verification purposes.

**Key words:** multilevel methods, discrete methods, discrete-continual methods, local structural analysis, wavelet-based methods, verification, finite element method.

UDC 624.04; 539.3; 530.4. Bialystok A.M., Akimov P.A., Kaitoukov T.B., Afanasieva I.N., Vershinin V.V., Dmitriev D.S., Usmanov A.R., Chuzhinov A.S., Shcherbina S.V. **Finite element formulation and analysis of fluid – structure interaction problems**

This paper is devoted to fluid – structure interaction problems. Problem formulation, finite element discretization, simultaneous and partitioned solution procedures, are discussed, and advantages and disadvantages of their use are mentioned. Some state-of-the-art numerical solutions, obtained by ANSYS Mechanical, ANSYS CFX and ABAQUS, are also presented to indicate problems that can now be solved using currently available techniques.

**Key words:** finite element method, fluid – structure interaction problem, continual formulation, discrete formulation, solution procedures.

UDC 624.074,075. Gorodetsky A.S., Barabash M.S. **Computer simulation of erection of construction**

In this article the methods of taking into account structural scheme that changes in time during erection process of installation are considered. Nonlinear effects of this situation are shown. Also is considered the influence of erection process on efforts that arise into elements of skeleton-type building with solid stiffening core. The purpose of theoretical investigation is to determine the influence of erection process on stress-strain state of load-bearing systems for buildings and installations. Are shown the examples of modelling erection process for high-rise building and unique structures by top-down method.

**Key words:** modelling, life cycle, erection process, load-bearing system, nonlinearity.

UDC 539.3. Tyapin A.G. **Special features of the seismic analysis for the main npp structures**

Approaches to the seismic analysis of the main NPP structures are described. These approaches are implemented in the recently published Russian standards. The main differences with civil engineering codes are discussed.

**Key words:** seismic safety of structures, dynamic analysis, standards.

UDC 539.3. Sidorov V.N. **Taking into account results of structure experimental studies at the formation of its calculation model**

The paper presents an algorithm for prompt updating of a structure

computer simulation model, based on consideration of the results of the structure monitoring. Correction is to adjust the eigenvalues spectrum of the calculation model using the values of the frequency of free vibrations obtained in the course of structure dynamic tests. It is believed that by measurements during the monitoring, some of the values of natural frequencies of the object can be obtained and their appropriate forms of free oscillations can be established.

**Key words:** computer model, the adjustment model, the natural frequencies, dynamic, error disturbance.

UDK 532.5:519.6. Kashevarova G.G., Martirosyan A.S. **Definition breakthrough wave hydrodynamic pressure on the building**

Currently looking at building up areas of the city within the area of a possible flood, for making design decisions required to estimate the mechanical safety of the designed building or to provide and justify its protection measures. For this it's necessary to know the hydrodynamic pressure of the load breakthrough wave on a streamlined object. To solve this problem we used software package Flow Vision. We study the influence of flow rate, as well as the parameters of the building (its shape, size, orientation relative to the direction of flow – stream) on the value of the hydrodynamic pressure. To do this, we used a mathematical theory of planning multifactor experiment.

**Key words:** wave breakthrough, hydrodynamic pressure, computer simulation, Flow Vision, multifactor experiment planning theory.

UDC 624.04; 539.3. Lalin V.V., Kushov D.A. **Solution of the problem of stability of a compressed rod dynamic method with the shear stiffness and tensile**

This article is dedicated to the geometrically nonlinear plane dynamic problems of the linear elastic rods. The differential and variational formulations are given. The dynamic stability equations were obtained. Exact solutions for the stability problems of a compressed rod with bending, shear and longitudinal stiffness being taken into account and with different types of end fixity were obtained by a dynamic method.

**Keywords:** geometrically nonlinearity, dynamic stability, stability of a compressed rod, critical load.

UDC 624.04; 539.3; 534. Potapov A.N., Ufimtsev E.M., Zyambaev N.A. **Analysis of oscillations of crane truss under the influence of disaster exposure**

Considered the time analysis of constructive nonlinear systems under dynamic loads. Is an example of the dynamic calculation of the metal crane truss with its complete destruction from the action of the emergency load due to breakage of the bridge crane sling cargo.

**Key words:** method, time analysis, mathematical model, vibration, dynamic reaction, constructive nonlinearity, bridge crane.

UDC 624.012.045. Gornostaeв I.S., Klyeva N.B., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. **Deformability of reinforced concrete composite constructions with inclined cracks**

The paper presents a calculation model for deformability of reinforced concrete composite constructions with inclined cracks, based on five blocks design scheme, including various types of inclined cracks and the design scheme as a single strip. The calculation method is developed for determining the deformability of reinforced concrete composite constructions with oblique cracks, based on working hypotheses formulated taking into account the conditional concentrated shifts in joints and junctures, cracks, uneven deformation of concrete and rebar and concrete discontinuities effect.

**Key words:** concrete composite constructions, deformation, inclined cracks, discontinuity, calculating scheme, conditional concentrated shifts, junctures.

UDC 539.3. Tarabrin G.T. **Buckling sloping CONICAL casing hinged edges on an elastic plate**

Elastic shallow shell in the shape of a truncated cone large direct its base is pivotally attached to the loop holes in an elastic infinite plate, and the inside of the smaller base shell is inserted and hinged elastic circular plate. Axial compression, this construction is transformed into a plane. The problem of the stress-strain state of structural elements in this transformation. The problem of the minimum compressive force, under the influence of which the conical hull abruptly changes the direction of convexity.

**Key words:** elastic plates and shells, the stress-strain state.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Травуш В.И.</b> Об истории и основных итогах V международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» .....	2
<b>Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Павлов А.С., Кайтуков Т.Б., Афанасьева И.Н.</b> О разработке, исследовании и верификации корректных численных методов решения нелинейных задач деформирования, устойчивости и закритического поведения тонкостенных оболочечно-стержневых конструкций .....	7
<b>Акимов П.А., Мозгалева М.Л., Кайтуков Т.Б., Негрозов О.А., Моджтаба Аслами.</b> О верификации вейвлет-реализаций многоуровневых дискретных и дискретно-континуальных методов локального расчета строительных конструкций .....	14
<b>Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Кайтуков Т.Б., Афанасьева И.Н., Вершинин В.В., Дмитриев Д.С. Усманов А.Р., Чужинов А.С., Щербина С.В.</b> Постановка, конечноэлементная аппроксимация и алгоритмы решения задач расчетного обоснования связанных систем «сооружение – жидкость» .....	21
<b>Городецкий А.С., Барабаш М.С.</b> Компьютерное моделирование процесса возведения строительных конструкций .....	28
<b>Тяпин А.Г.</b> Особенности расчета на сейсмические воздействия ответственных сооружений АЭС .....	34
<b>Сидоров В.Н.</b> Об учете результатов экспериментальных исследований сооружения при формировании его расчетной модели .....	38
<b>Кашеварова Г.Г., Мартиросян А.С.</b> Определение гидродинамического давления волны прорыва на здания .....	42
<b>Лалин В.В., Кушова Д.А.</b> Решение задачи устойчивости сжатого стержня динамическим методом с учетом жесткостей на сдвиг и растяжение .....	49
<b>Потапов А.Н., Уфимцев Е.М., Зямбаев Н.А.</b> Анализ колебаний подкрановой фермы при аварийном воздействии .....	55
<b>Горностаев И.С., Клюева Н.В., Колчунов В.И., Яковенко И.А.</b> Деформативность железобетонных составных конструкций с наклонными трещинами .....	60
<b>Тарабрин Г.Т.</b> Процелкивание пологой конической оболочки с шарнирно закрепленными краями на упругих пластинах .....	67
<b>Наши юбиляры</b>	
Геннадью Тимофеевичу Тарабрину – 80 лет .....	74
Леониду Семеновичу Ляховичу — 80 лет .....	76
<b>Персоналии</b>	
Памяти Владимира Васильевича Шугаева .....	77

---

### Список корреспондентских пунктов журнала СМ и РС

- |   |  |
|---|--|
| 1. Волгоград, ВолГАСУ                       | акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ректор <b>В.А. Игнатьев</b>                |
| 2. Омск, СибАДИ                             | д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительной механики <b>Г.М. Кадисов</b>     |
| 3. Орел, ОрелГТУ                            | акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., директор АСИ ОрелГТУ <b>В.И. Колчунов</b>  |
| 4. Пермь, ПГТУ                              | д-р техн. наук, зав. каф. строительной механики <b>Г.Г. Кашеварова</b>         |
| 5. Ростов-на-Дону, РГСУ                     | д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительной механики <b>Г.В. Васильков</b>   |
| 6. Тбилиси, ИСМиС им. К.С. Завриева, Грузия | д-р техн. наук, проф., чл.-корр. ИА Грузии, директор ИСМиС <b>П.А. Реквава</b> |

## СОСТАВ СИСТЕМЫ

**SCAD** — расчетная система конечно-элементного анализа конструкций, ориентированная на решение задач проектирования зданий и сооружений достаточно сложной структуры, где основными задачами являются определение напряженно-деформированного состояния конструкций, подбор и формирование сечений, расчет и конструирование узлов, расчет оснований и фундаментов.

**ФОРУМ** — препроцессор, служащий для формирования укрупненных моделей и импорта данных из архитектурных систем.

**КРИСТАЛЛ** — расчет и проверка элементов стальных конструкций по СНиП II-23-81\*, СП 53-102-2004, СП 16.13330.2011, ДБН В.2.6-163:2010

**АРБАТ** — подбор арматуры и экспертиза элементов железобетонных конструкций по СНиП 52-01-2003, СП 52-101-2003, СНиП 2.01.07-85.

**КАМИН** — экспертиза элементов каменных и армокаменных конструкций по СНиП II-22-81, СНиП 2.01.07-85.

**МОНОЛИТ** — проектирование монолитных ребристых железобетонных перекрытий.

**КОМЕТА** — расчет и конструирование узлов стальных конструкций.

**КРОСС** — расчет коэффициентов постели фундаментных плит на упругом основании.

**ВЕСТ** — расчет нагрузок по СНиП и ДБН «Нагрузки и воздействия».

**КОНСТРУКТОР СЕЧЕНИЙ** — формирование произвольных сечений из стальных прокатных профилей и листов.

**КОНСУЛ** — формирование сечений, исходя из теории сплошных стержней.

**ТОНУС** — формирование сечений, исходя из теории тонкостенных стержней.

**СЕЗАМ** — поиск сечения типа «коробка», «двутавр» или «швеллер», близкого по характеру заданному.

**ЗАПРОС** — расчет элементов оснований и фундаментов по СНиП 2.02.01-83\*, СП 50-101-2004, СП 22.13330.2011, ДБН В.2.1-10-2009

**ДЕКОР** — расчет и проверка элементов деревянных конструкций по СНиП II-25-80, СП 64-13330.2011

**ОТКОС** — определение коэффициента запаса устойчивости откосов и склонов.

**КОКОН** — электронный справочник для определения коэффициентов концентрации напряжений.

**КУСТ** — электронный расчетно-теоретический справочник инженера-проектировщика.

